

<https://doi.org/10.52676/1729-7885-2024-3-115-122>

УДК 621.039.6: 533.9.08: 621.039.66

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ДЕЙТЕРИЕВОЙ ПЛАЗМЫ С ПОВЕРХНОСТЬЮ ВОЛЬФРАМА ПОСЛЕ КАРБИДИЗАЦИИ В ППР

**И. А. Соколов^{1,2}, А. Ж. Миниязов¹, Г. К. Жанболатова^{1*}, Т. Р. Туленбергенов^{1,2},
Н. М. Мухамедова¹, А. Ж. Кайырбекова¹, А. А. Агатамова¹**

¹ Филиал «Институт атомной энергии» РГП НЯЦ РК, Курчатов, Казахстан

² НАО «Университет имени Шакарима города Семей», Семей, Казахстан

* E-mail для контактов: kaiyrdu@nnc.kz

Данная работа посвящена исследованию влияния смешанных слоев $W-C$ на изменение морфологии поверхности и структурно-фазовых состояний поверхностного слоя вольфрама при воздействии D плазмы. Эксперименты по карбидизации и плазменному облучению проведены на плазменно-пучковой установке (ППУ) при различных энергиях ионов и температурах поверхности. В качестве рабочего газа при карбидизации использовался метан (CH_4), при плазменном облучении – дейтерий (D). Воздействие D плазмы с энергией ионов 1 кэВ на поверхность вольфрама со смешанными слоями привело к полному разрушению карбидных соединений при температуре ~ 1750 °С и дальнейшей эрозии вольфрама. Однако, при температуре ~ 900 °С смешанные слои на основе двух фаз (WC и W_2C) обладают высоким сопротивлением дейтериевому воздействию.

Ключевые слова: вольфрам, карбид вольфрама, плазма, дейтерий, облучение.

ВВЕДЕНИЕ

Как известно, вольфрам (W) выбран в качестве плазмообращенного материала дивертора ИТЭР ввиду высокой температуры плавления, хорошей теплопроводности, очень высокого порога распыления под действием частиц плазмы и малого захвата трития [1]. Тем не менее, при воздействии плазмы на W происходит модификация его поверхности посредством ионной бомбардировки, включая распыление материала, отражение, имплантацию и удержание (диффузия и захват) ионов. Нагрев же поверхности W в основном происходит электронами из плазмы. Следовательно, дивертор будет подвергаться интенсивному плазменно-тепловому воздействию с энергией изотопов водорода (H , D , T) от нескольких эВ до нескольких кэВ с небольшим количеством ионов гелия (He) в диапазоне энергий МэВ [2]. Необходимо отметить, что в токамаках вследствие конструкционных особенностей и выбора плазмообращенных материалов присутствуют примеси углерода (C) [3–5], которые приводят к образованию смешанных слоев $W-C$ в виде карбидов вольфрама (WC , W_2C) [4–7]. Карбидизированный слой на поверхности вольфрама может действовать как диффузионный барьер и играть важную роль в изменениях морфологии поверхности вольфрама, а также в захвате, удержании и диффузии ионов гелия и изотопов водорода [8]. Поэтому исследование влияния смешанных слоев $W-C$ на поверхности вольфрама на его физико-механические свойства и структурно-фазовое состояние при взаимодействии с D плазмой является важной задачей.

Ранее нами был разработан способ карбидизации поверхности вольфрама в пучково-плазменном разряде (ППР) и получены экспериментальные данные по исследованию процесса поверхностной карбидизации вольфрама в зависимости от длительности и

температуры [9–12]. В качестве рабочего газа при зажигании ППР использовался метан. Разложение метана в результате взаимодействия с электронным пучком позволяет моделировать условия локального переноса атомов углерода вдоль смачиваемых плазмой поверхностей за счет углеводородов. Результаты работ по исследованию взаимодействия гелиевой плазмы со смешанными слоями $W-C$ показали, что на поверхности вольфрама ускоряется образование коралловой структуры при низких температурах облучения и существенно изменяется морфология поверхности вольфрама [13].

В настоящей работе мы приводим результаты экспериментальных работ по исследованию влияния смешанных слоев $W-C$ на изменение морфологии поверхностного слоя вольфрама при воздействии D плазмы.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Карбидизация поверхности вольфрама в ППР и плазменное облучение проводились на ППУ. ППУ представляет собой источник стационарной плазмы с продольным магнитным полем, в котором для генерации плазмы используется ППР. Плазма образуется в результате взаимодействия электронного пучка с рабочим газом, подаваемым в разрядную камеру. Подробное описание установки представлено в работах [9, 14, 15]. Параметры плазмы измеряются электрическим зондом Ленгмюра, размещенным на расстоянии 3–5 мм от мишенного узла и перемещающемся в радиальном направлении оси ППР.

Для проведения экспериментов были подготовлены образцы в виде дисков $\varnothing 10 \times 2 \pm 0,1$ мм из вольфрамового прутка марки High purity (99,99%). Облучаемая сторона всех заготовок подвергалась механической шлифовке и полировке до степени шероховатости $Ra = 0,02$ мкм.

**ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ДЕЙТЕРИЕВОЙ ПЛАЗМЫ С ПОВЕРХНОСТЬЮ ВОЛЬФРАМА
ПОСЛЕ КАРБИДИЗАЦИИ В ППУ**

Таблица 1. Параметры проведения экспериментов по карбидизации и результаты полуколичественной оценки содержания фаз

| Образец | Температура, ±10 °С | Длительность, с | Ток ионов, мА | Результаты полуколичественной оценки содержания фаз | | |
|--------------------|---------------------|-----------------|---------------|---|-------------------------------|---------------------------------|
| | | | | WC (гекс., P-6m2) | W ₂ C (орт., Pbcn) | W ₂ C (гекс., P-31m) |
| 3-WC | 1500 | 3600 | ≤60 | 82 | 18 | — |
| 4-WC | | | | 81 | — | 19 |
| 5-W ₂ C | 1700 | 1200 | ≥120 | 22 | — | 78 |
| 6-W ₂ C | | | | 18 | — | 82 |

Перед проведением экспериментов по карбидизации образцы вольфрама отжигали на ППУ в режиме нагрева электронным пучком. Температура поверхности при отжиге составляла 1350±20 °С, длительность – 3600 с. Давление в камере взаимодействия во время отжига составляло $(1,60 \pm 0,03) \cdot 10^{-3}$ Па. Для измерения температуры с тыльной стороны образца устанавливалась термопара, а контроль температуры облучаемой поверхности осуществлялся пирометром.

Эксперименты по карбидизации были проведены согласно ранее разработанному способу [9, 10]. Условия проведения карбидизации и результаты полуколичественной оценки содержания фаз в образцах представлены в таблице 1. Давление газа в экспериментальной камере и энергия ионов метана были постоянными и составили $\sim(1,08-1,20) \cdot 10^{-1}$ Па и 500 эВ, соответственно.

Выбор данных условий основывался на результатах экспериментов, ранее проведенных в работах [9–12]. Образцы были промаркированы в соответствии с фазовым составом смешанных слоев W-C (3-WC, 4-WC, 5-W₂C, 6-W₂C). Для сравнительного анализа в перечень исследуемых образцов были включены образцы без карбидизированного слоя на поверхности (1-W и 2-W).

Изучение структурно-фазовых превращений в приповерхностных слоях вольфрама производилось методом рентгенофазового анализа с углом 2θ в диапазоне 25–80° с использованием Si Ka-излучения ($\lambda = 1,54184 \text{ \AA}$). Для идентификации фазового состава образцов вольфрама использовали базу данных Crystallography Open Database и базу данных PDF-2 ICDD Release 2004 [16].

Для исследования влияния смешанных слоев W-C на изменение морфологии поверхности и структурно-фазовых состояний поверхностного слоя вольфрама при воздействии D плазмы необходимо было обеспечить достаточно высокий флюенс ионов D. На ППУ для накопления флюенса ионов D на уровне $1,06 \cdot 10^{24} - 1,65 \cdot 10^{25} \text{ м}^{-2}$ экспозиция образцов в плазме длилась в течение 3600 с. Были выбраны значения температуры поверхности образцов 900 °С и 1750 °С, которые соответствуют тепловым потокам в ИТЭР $\sim 10 \text{ МВт/м}^2$ стационарно и $\sim 20 \text{ МВт/м}^2$ импульсно, согласно ранее проведенным расчетам [17]. При этом плотность плазмы для экспериментов при разных температурах поверхности составила $N_{e 900^\circ\text{C}} = 5,89 \cdot 10^{17} \text{ м}^{-3}$,

$N_{e 1750^\circ\text{C}} = 9,13 \cdot 10^{17} \text{ м}^{-3}$, а электронная температура – $T_{e 900^\circ\text{C}} = 8,8 \text{ эВ}$, $T_{e 1750^\circ\text{C}} = 1,8 \text{ эВ}$. Энергия ионов D определялась потенциалом смещения, который поддерживался на уровне $U_{см} = -1000 \text{ В}$. На рисунке 1 показан процесс облучения образцов вольфрама D плазмой.

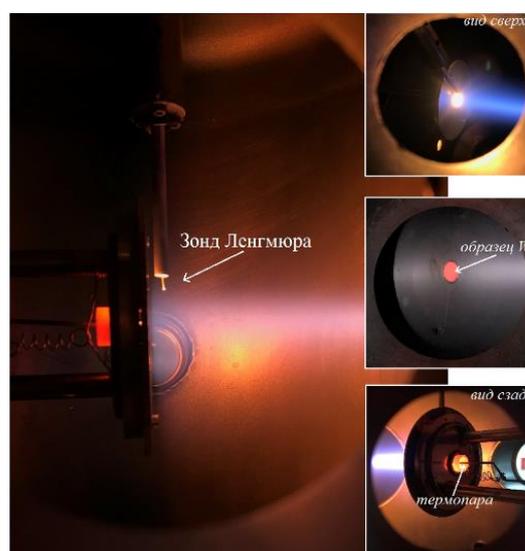


Рисунок 1. Процесс облучения W образца D плазмой

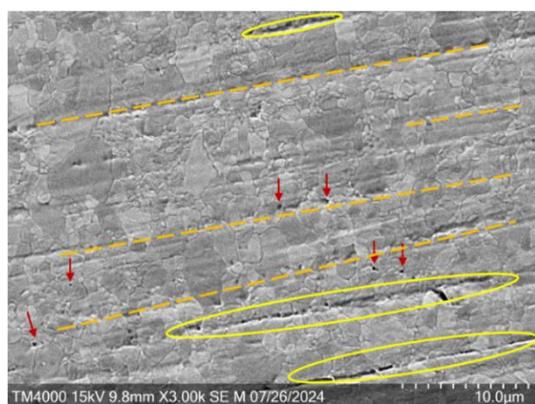
Анализ микроструктуры поверхности образцов вольфрама до и после воздействия D плазмы проводился методом сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) на приборах Hitachi TM 4000 с приставкой энергодисперсионного спектрального анализа Bruker и Tescan Vega 3 с приставкой энергодисперсионного спектрального анализа X-Act.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

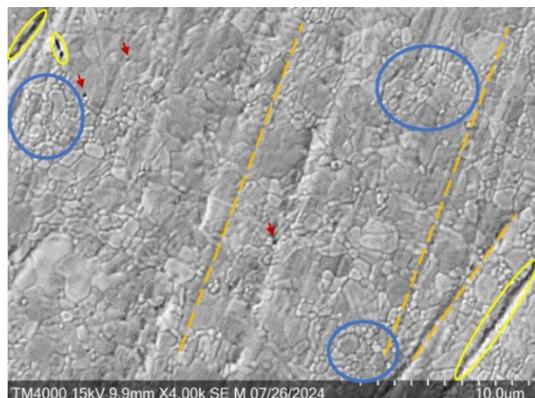
Морфология поверхности образцов чистого W и W со смешанными слоями до и после воздействия D плазмы при разных температурах представлена на рисунках 2, 3, 5. На рисунке 2 представлена морфология поверхности образцов чистого W после воздействия D плазмы.

Поверхности образцов 1-W, 2-W после облучения дейтериевой плазмой имеют типичный вид W подвергнутого рекристаллизационному отжигу [18, 19]. На поверхности наблюдаются следы механической полировки, царапины и поверхностные дефекты (отмечены пунктирной линией). Вдоль направления следов механической полировки наблюдаются трещ-

ины (отмечено зелеными кружками). Можно предположить, что при облучении плазмой в поверхности развиваются напряжения, приводящие к растрескиванию поверхностных дефектов и углублению их. Местами на поверхности образцов можно наблюдать микроскопические поры (отмечены красными стрелками), которые образовались независимо от температуры облучения. Образование глубоких трещин можно также объяснить тем, что тесно расположенные поры, сливаясь друг с другом, образовали каналы по границам зерен. Согласно [19] на поверхности образца 2-W наблюдается микроструктура, характерная для процессов собирательной и вторичной стадий рекристаллизации. Можно заметить, что зародыши рекристаллизации появляются в основном по границам зерен (отмечено синими кружками). Отсутствие на поверхности данных образцов стандартного blisterного поведения вероятно связано с низким потоком ионов, который в данной работе равен $2,95 \cdot 10^{21} \text{ м}^{-2}\text{с}^{-1}$ ($900 \text{ }^\circ\text{C}$) и $4,57 \cdot 10^{21} \text{ м}^{-2}\text{с}^{-1}$ ($1750 \text{ }^\circ\text{C}$), и их высокой энергией. Согласно современным источникам, обычно, образование пузырей на поверхности вольфрама, наблюдается только при экспериментах по имплантации низкоэнергетической плазмой дейтерия с потоком более $10^{22} \text{ м}^{-2}\text{с}^{-1}$.



а)



б)

Рисунок 2. Микроструктура поверхности образцов после воздействия D плазмы: 1-W, облучение D плазмой при температуре $905 \pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$ (а) и 2-W, облучение D плазмой при температуре $1749 \pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$ (б)

Микроструктура поверхности образцов вольфрама со смешанными слоями в виде WC, W₂C до и после воздействия D плазмы при температуре $900 \pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$ представлена на рисунке 3. Известно, что в термоядерных реакторах, использующих в качестве плазмообращенных материалов C и W, при переосаждении примесей C образуются смешанные слои W-C с четкими границами между W, смешанным слоем W-C и осажденным C в виде покрытия [20, 21]. В то же время предыдущие наши результаты [10] свидетельствуют о сильной зависимости осажденных слоев (как углеродных, так и смешанных слоев) от температуры поверхности образцов вольфрама. Поверхность образца 3-WC до и после хорошо это иллюстрирует. До облучения, как видно на рисунке 3, а, поверхность образца 3-WC покрыта сплошным слоем с высоким содержанием углерода (до 90 ат.%). После воздействия D плазмы на поверхности образца 3-WC (рисунок 3, б) наблюдаются области отслоения и частичного разрушения образованной углеродной пленки, что говорит о ее относительно низкой температурной стабильности. Данные элементного анализа (таблица 1) свидетельствуют о том, что под разрушенной углеродной пленкой атомы C находятся в связанном виде. Поверхности образцов после облучения относительно целые, трещин на границах зерен или в зернах не наблюдается.

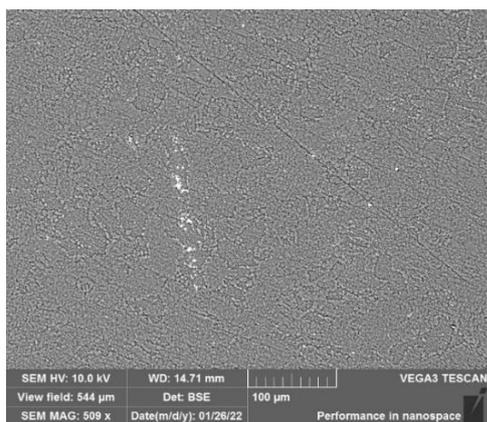
Таблица 1. Результаты элементного анализа поверхности образцов после карбидизации

| Наименование | C, ат.% | O, ат.% | W, ат.% |
|------------------------|---------|---------|---------|
| 3-WC | 96,89 | 0,76 | 2,35 |
| 3-WC + D | 25,38 | 0,78 | 73,84 |
| 5-W ₂ C | 28,10 | 12,97 | 59,93 |
| 5-W ₂ C + D | 33,60 | 3,13 | 63,27 |

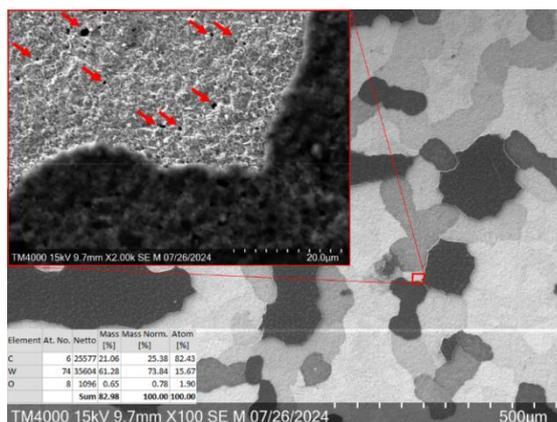
Как видно из рисунка 3, в, поверхность образца 5-W₂C характеризуется ярко выраженной зеренной структурой и отсутствием углеродной пленки. Однако на поверхности образцов наблюдается большое количество трещин. При этом распространение трещин на поверхности покрытия носит разносторонний характер. Наблюдается наличие как протяженных трещин, так и коротких локальных трещин. Результаты элементного анализа, приведенные в таблице 1, свидетельствуют о том, что углерод на поверхности образцов присутствует уже в химической связанном виде, образуя фазы карбидов вольфрама.

На поверхности образца 5-W₂C (рисунок 3, г) после облучения дейтериевой плазмой наблюдаются четко выраженные зерна с перепадом высот. На поверхности образцов 3-WC, 5-W₂C характерных следов (блистеры, отшелушивание или флекинг) взаимодействия дейтерия с приповерхностными слоями не наблюдается. Однако, после облучения можно наблюдать наличие пор (отмечены красными стрелками на рисунках 3, б и 3, г). Размеры и формы пор отличаются в зависимости от вида смешанного слоя.

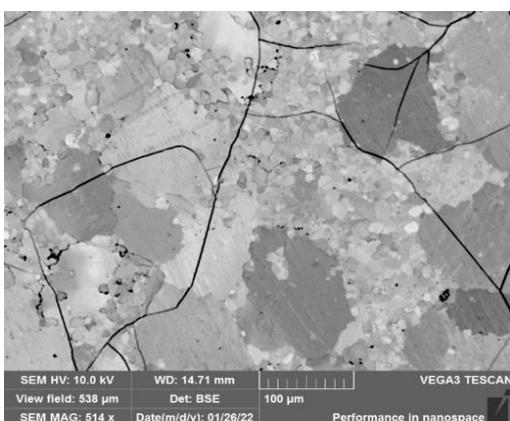
**ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ДЕЙТЕРИЕВОЙ ПЛАЗМЫ С ПОВЕРХНОСТЬЮ ВОЛЬФРАМА
ПОСЛЕ КАРБИДИЗАЦИИ В ППР**



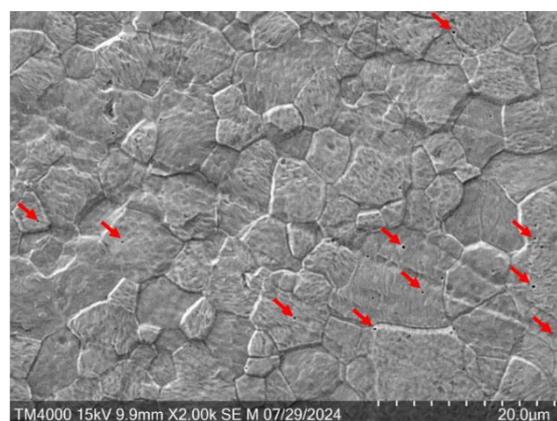
а) 3-WC



б) 3-WC + D



в) 5-W₂C



г) 5-W₂C + D

Рисунок 3. Микроструктура поверхности образцов вольфрама с карбидизированной поверхностью до (а, в) и после (б, г) воздействия D плазмы (900±10 °C)

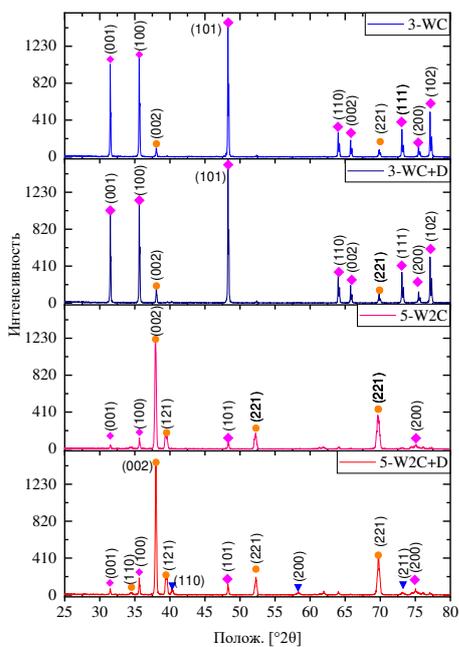


Рисунок 4. Дифрактограммы исследованных образцов до и после воздействия D плазмы при температуре 900±10 °C (▼ – W, ◆ – WC, ● – W₂C)

Согласно результатам рентгенофазового анализа (рисунок 4) после облучения образца 3-WC основной фазового состава остается карбид вольфрама WC, характеризующийся гексагональной кристаллической решеткой, пространственная группа P-6m2, параметры решетки a=b=2,9065 Å, c=2,9366 Å. Пики с низкими интенсивностями идентифицированы как гексагональная модификация полукарбида вольфрама W₂C (пространственная группа P-31m).

Основной фазового состава образца 5-W₂C остается фаза W₂C орторомбической сингонии. Однако после плазменного облучения заметно увеличение интенсивности пиков, принадлежащих фазе W₂C, и наблюдаются пики малой интенсивности, принадлежащие W.

Микроструктура поверхности образцов вольфрама со смешанными слоями в виде WC, W₂C до и после воздействия D плазмы при температуре 1750±10 °C представлена на рисунке 5. Поверхность образцов 4-WC и 6-W₂C до облучения характеризуется наличием развитой морфологии с выраженной зеренной структурой. Однако на поверхности образца 4-WC заметны участки углеродной пленки после разрушения и отслоения. Как было отмечено ранее, по характеру раз-

рушения углеродная пленка хрупкая и имеет низкую адгезию с поверхностью подложки.

Главной особенностью образцов после облучения является рельеф, несхожий с образцами 1-*W*, 2-*W* без смешанного слоя, и отсутствие протяженных трещин по всей поверхности, которые были распределены в основном по границам зерен вольфрама (рисунок 5, а, в). Отсутствие трещин может быть объяснено распылением вольфрама высокоэнергичными ионами *D* при высокой температуре облучения. После облучения при высокой температуре на поверхности наблюдается высокая концентрация субмикронных пор, также наблюдаются области слияния тесно расположенных пор (отмечено голубыми кружочками на рисунке 5, б). Из теории [22] следует, что поры чаще появляются вдоль границ зерен и различных дефектов, в результате рекристаллизационных процессов в материале. При облучении поверхности ионами *D* концентрация легко диффундирующих атомов в приповерхностном слое возрастает и, как следствие, возрастает поток атомов газа в зародившиеся поры и их размеры увеличиваются [22]. Распыление поверхностного слоя приводит к выходу пор на поверхность. Кроме того, выход на поверхность пор проис-

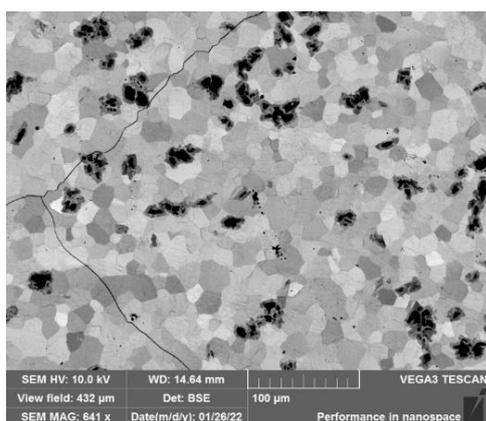
ходит в результате диффузии пор под действием ионно-индуцированных напряжений в приповерхностном слое образца.

На рисунке 6 представлен график изменения массы образцов после облучения.

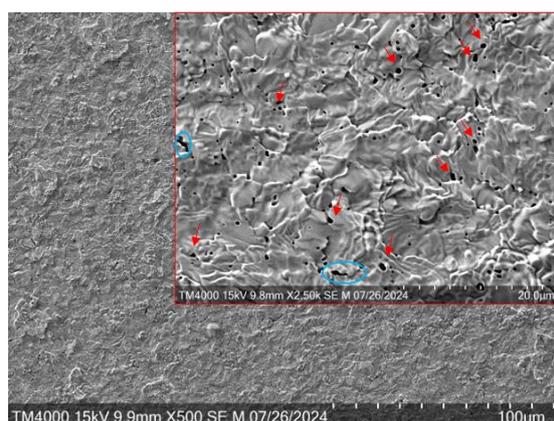
Как видно из рисунка 6, масса образцов 4-*WC* и 6-*W₂C* после воздействия воздействия *D* плазмы снижается, что свидетельствует о распылении образцов при высокой температуре облучения и высокой энергии. После воздействия *D* плазмы при высокой температуре на поверхности образцов также наблюдаются области, характерные пластической деформации путем скольжения (отмечены оранжевыми кружками на рисунке 5, г), причиной образования которых может быть высокая температура облучения и высокая энергия ионов *D*.

Распыление поверхности в результате воздействия *D* плазмы подтверждают и результаты рентгеноструктурного анализа, приведенного на рисунке 7.

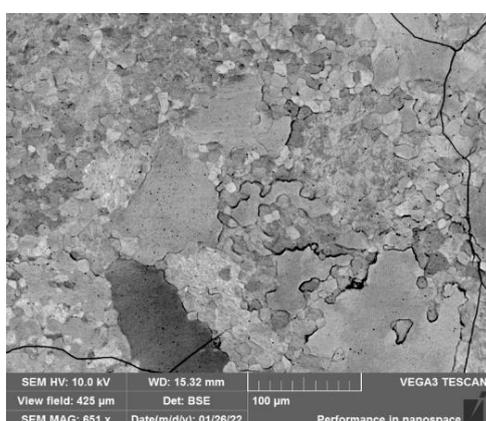
После облучения дейтериевой плазмой основной фазового состава образцов 4-*WC* и 6-*W₂C* становится фаза металлического вольфрама, пиков других фаз на дифрактограмме не наблюдается.



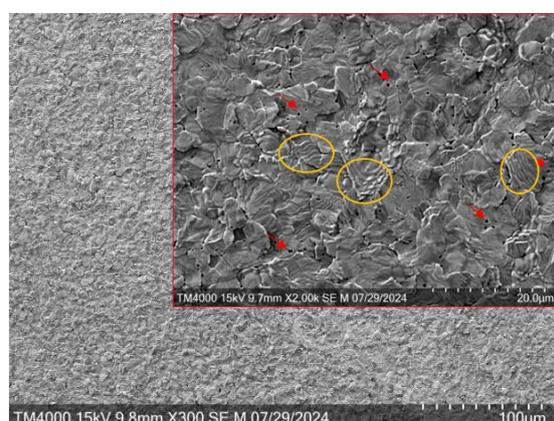
а) 4-*WC*



б) 4-*WC* + *D*



в) 6-*W₂C*



г) 6-*W₂C* + *D*

Рисунок 5. Микроструктура поверхности образцов вольфрама с карбидизированной поверхностью до (а, в) и после (б, г) воздействия *D* плазмы (1750 ± 10 °C)

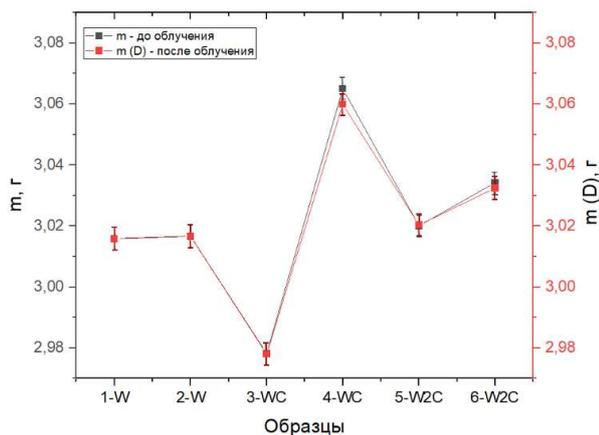


Рисунок 6. График изменения массы образцов

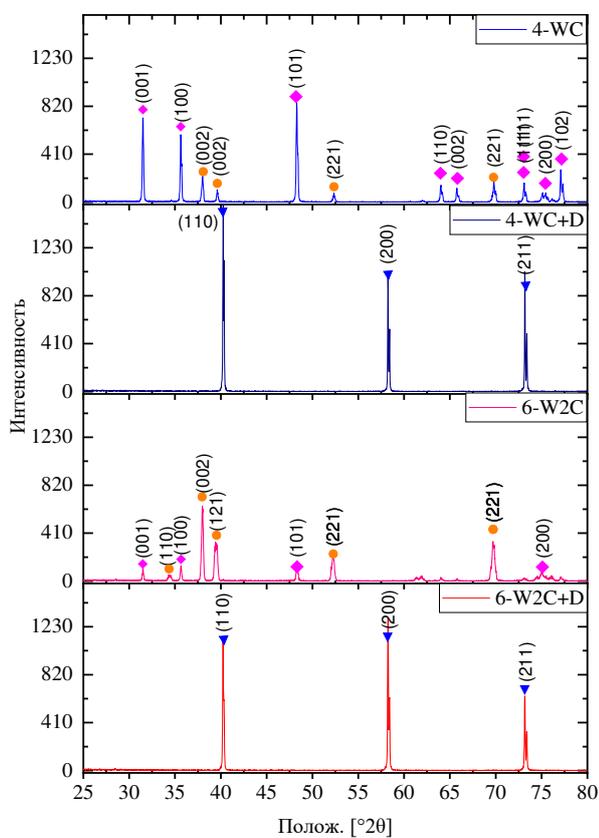


Рисунок 7. Диффрактограммы исследованных образцов до и после воздействия D плазмы при температуре 1749 ± 10 °C (▼ – W , ◆ – WC , ● – W_2C)

Согласно работам [23–24], смешанные слои $W-C$ имеют более высокий коэффициент распыления, чем чистый W . Авторы полагают, что эрозия карбидов вольфрама в основном вызвана преимущественным физическим распылением атомов C под действием высокоэнергичных ионов D из-за большой разницы масс между атомами W и C , а также низкой энергии связи $W-C$, что отмечают в работе [25]. Важную роль в распылении также имеет температура поверхности образца при облучении.

Выводы

Проведены эксперименты по исследованию влияния смешанных слоев $W-C$ на изменение морфологии поверхности и структурно-фазовых состояний поверхностного слоя вольфрама при воздействии D плазмы. Эксперименты осуществлялись при расчетных температурах ~ 900 °C и ~ 1750 °C, для имитации тепловых потоков в диверторе термоядерного реактора ИТЭР ~ 10 МВт/м² и ~ 20 МВт/м², соответственно. Выполнена оценка концентрации, электронной температуры, потока ионов и флюенса ионов дейтерия при облучении вольфрама.

По результатам микроструктурного анализа установлено, что после воздействия D плазмы с энергией ионов 1 кэВ на образцы вольфрама со смешанными слоями $W-C$ в виде карбидов вольфрама (WC , W_2C) характерных следов (блистеры, отшелушивание или флекинг) взаимодействия дейтерия с приповерхностными слоями вольфрама независимо от температуры облучения не наблюдается. Однако наличие смешанных слоев приводит к образованию субмикронных пор, которые сливаясь друг с другом, образуют каналы по границам зерен. При температуре ~ 900 °C карбидизированные слои на основе двух фаз (WC и W_2C) имеют высокое сопротивление дейтериевому воздействию, что подтверждается минимальными изменениями в фазовом составе. Воздействие D плазмы на поверхность вольфрама со смешанными слоями при температуре ~ 1750 °C привело к полному разрушению карбидных соединений и дальнейшей эрозии вольфрама. Это свидетельствует о том, что при экстремальных термических нагрузках наличие смешанных слоев приведет к распылению плазмообращенных материалов и образованию пыли.

Таким образом, результаты исследования говорят о важности контроля температурных режимов и морфологических изменений при взаимодействии дейтериевой плазмы с поверхностью вольфрама со смешанными слоями в виде карбидов вольфрама. Полученные результаты являются ценным вкладом в понимание взаимодействия плазмы с карбидизированной поверхностью вольфрама и могут быть использованы для оптимизации технологий, используемых в термоядерных установках и исследовательских токамаках, а также на разработку новых подходов к улучшению эксплуатационных характеристик конструкционных материалов в условиях плазменных воздействий.

Работа выполнена в Национальном ядерном центре Республики Казахстан в рамках научно-технической программы №BR23891779 по теме «Научно-техническое обеспечение экспериментальных исследований на Казахстанском материаловедческом токамаке КТМ».

ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

- Pintsuk G., Hasegawa A. Tungsten as a Plasma-Facing Material // Reference Module in Materials Science and Materials Engineering. – 2019. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803581-8.11696-0>
- Bolt H., Barabash V., Federici G. et al. (2002). Plasma facing and high heat flux materials-needs for ITER and beyond // Journal of Nuclear Materials. – 2002. – Vol. 307. – P. 43.
- Mayer M. et al. Tungsten erosion and redeposition in the all-tungsten divertor of ASDEX Upgrade // Physica Scripta. – 2009. – Т. 138. <https://doi.org/10.1088/0031-8949/2009/T138/014039>
- Ueda Y., Schmid K., Balden M. et al. Baseline high heat flux and plasma facing materials for fusion // Nucl. Fusion. – 2017. – Vol. 57. – P. 092006. <https://doi.org/10.1088/1741-4326/aa6b60>
- Budaev V.P., Fedorovich S.D., Dedov A.V., et al. High-heat flux tests of tungsten divertor mock-ups with steady-state plasma and e-beam // Nuclear Materials and Energy. – 2020. – Vol. 25. <https://doi.org/10.1016/j.nme.2020.100816>
- Muhammad Luqman Khalid et al. (2019) // Mater. Res. Express. – 2019. – Vol. 6. – P. 066551. <https://doi.org/10.1088/2053-1591/ab087f>
- Rubel M, Philipps V, Huber A, and Tanabe T. Formation of carbon containing layers on tungsten test limiters // Physica Scripta. – 1999. – Т. 81. – P. 61–63.
- Ueda Y., et al. Carbon impurity behavior on plasma facing surface of tungsten // Fusion Engineering and Design. – 2006. – Vol. 81. – P. 233–239.
- Жанболотова Ф.К., Бакланов В.В., Туленберженов Т.Р., Миниязов А.Ж., Соколов И.А. Карбидизация поверхности вольфрама в пучково-плазменном разряде // Вестник НЯЦ РК. – 2020. – Вып. 4. – С. 77–81. [G. K. Zhanbolatova, V. V. Baklanov, T. R. Tulenbergenov, A. Zh. Miniyazov, I. A. Sokolov Carbide of the tungsten surface in a beam-plasma discharge // NNC RK Bulletin. – 2020. – Issue 4. – P. 77–81.] (In Russ.)
- Baklanov V., Zhanbolatova G., Skakov M., et al. Study of the Temperature Dependence of a Carbided Layer Formation on the Tungsten Surface Under Plasma Irradiation // Materials Research Express. – 2022. – Vol. 9. – P. 016403. <https://doi.org/10.1088/2053-1591/ac4626>
- Жанболотова Ф.К., Миниязов А.Ж., Туленберженов Т.Р., Соколов И.А., Букина О.С. Исследование карбидизации поверхности вольфрама при плазменном облучении // Вестник НЯЦ РК. – 2021. – Вып. 3. – С. 37–43. <https://doi.org/10.52676/1729-7885-2021-3-37-43> [Zhanbolatova G.K., Miniyazov A.Z., Tulenbergenov T.R., Sokolov I.A., Bukina O.S. Investigation of tungsten surface carbide under plasma irradiation // NNC RK Bulletin. – 2021. Issue 3. – P. 37–43.] (In Russ)
- Skakov M.K., Baklanov V.V., Zhanbolatova G.K., Miniyazov A.Zh., Kozhakhmetov Ye.A., Gradoboev A.V. Research of the structural-phase state of tungsten surface layer cross-section after carbide in a beam-plasma discharge usage electron microscopy methods // NNC RK Bulletin. – 2023. – Issue 2. – P. 89–96. <https://doi.org/10.52676/1729-7885-2023-2-89-96>
- Skakov M.K., Miniyazov A.Z., Batyrbekov E.G, et al. Influence of the Carbided Tungsten Surface on the Processes of Interaction with Helium Plasma // Materials. – 2022. – Vol. 15. – P. 7821. <https://doi.org/10.3390/ma15217821>
- Патент РК на полезную модель № 2080. Имитационный стенд с плазменно-пучковой установкой / Колодешников А.А., Зуев В.А., Гановичев Д.А., и др. – опубл. 15.03.2017, Бюл. № 5. [Patent RK на полезную модель № 2080. Imitatsionnyy stand s plazmenno-puchkovoy ustanovkoy / Kolodeshnikov A.A., Zuev V.A., Ganovich D.A., i dr. – opubl. 15.03.2017, Byul. No. 5.] (In Russ.)
- Туленберженов Т.Р., Скаков М.К., Миниязов А.Ж., Соколов И.А., Кайырды Г.К. // Роль имитационного стенда с плазменно-пучковой установкой в исследованиях плазменно-поверхностного взаимодействия // Вестник НЯЦ РК. – 2019. – Вып. 4. – С. 51–58. <https://doi.org/10.52676/1729-7885-2019-4-51-58> [Tulenbergenov T.R., Skakov M.K., Miniyazov A.Zh., Sokolov I.A., Kayyrdy G.K. The role of a simulation bench with plasma- beam installation in researches of plasma-surface interection // NNC RK Bulletin. – 2019. – Issue 4. – P. 51–58.] (In Russ.)
- S. Gražulis, D. Chateigner, R. T. Downs, A. F. T. Yokochi, et al. Crystallography Open Database – an open-access collection of crystal structures // J. Appl. Cryst. – 2009. – Vol. 42. – P. 726–729.
- Skakov Mazhyn, Zhanbolatova Gainiya, Miniyazov Arman, Tulenbergenov Timur, Sokolov Igor, Sapatayev Yerzhan, Kozhakhmetov Yernat, Bukina Olga. Impact of High-Power Heat Load and W Surface Carbide on its Structural-Phase Composition and Properties // Fusion Science and Technology. – 2021. – Vol. 77. – P. 57–66. <https://doi.org/10.1080/15361055.2020.1843885>
- Skakov M.K., Baklanov V.V., Zhanbolatova G.K., et al. The effect of recrystallization annealing on the tungsten surface carbide in a beam plasma discharge // AIMS Materials Science. – Vol. 10(3). – P. 541–555.
- Горелик С. С., Добаткин С. В., Капуткина Л. М. Рекристаллизация металлов и сплавов. – М.: МИСИС, 2005. 432 с. [Gorelik S. S., Dobatkin S. V., Kaputkina L. M. Rekristallizatsiya metallov i splavov. – Moscow: MISIS. – 2005. – 432 p.]
- Maier, H., Rasinski, M., von Toussaint, U., Greuner, H., Böswirth, B., Balden, M. Kinetics of carbide formation in the molybdenum–tungsten coatings used in the ITER-like Wall // Physica Scripta. – 2016. – Т. 167. – P. 014048. <https://doi.org/10.1088/0031-8949/t167/1/014048>
- Linsmeier Ch., Reinelt M., Schmid K. Surface chemistry of first wall materials – from fundamental data to modeling // Journal of Nuclear Materials. – 2011. – Vol. 415. – Issue 1. – P. S212–S218. <https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2010.08.056>
- Беграмбеков Л.Б. Процессы в твердом теле под действием ионного и плазменного облучения: Учебное пособие. – М.: МИФИ, 2008. – 196 с. [Begrambekov L.B. Protsessy v tverdom tele pod deystviem ionnogo i plazmennogo oblucheniya: Uchebnoye posobie. – Moscow: MIFI. – 2008. – 196 p.] (In Russ)
- Tu H., Li C., Shi L. The erosion and retention properties of α -WC films by low-energy deuterium ion irradiation // Applied Surface Science. – 2023. – Vol. 608. – P. 155133.
- P. Jenus et al. Deuterium retention in tungsten, tungsten carbide and tungsten-ditungsten carbide composites // Journal of Nuclear Materials. – 2023. – Vol. 581. – P. 154455.
- Z. Zhao, F. Liu, L. Cao, et al. Investigation of indentation response, scratch resistance, and wear behavior of tungsten carbide coatings fabricated by two-step interstitial carburization on tungsten // Ceramics International. – 2021. – Vol. 47. – P. 30636–30647.

СӘУЛЕЛІК-ПЛАЗМАЛЫҚ РАЗРЯДТА КАРБИДТЕНГЕННЕН КЕЙІНГІ ВОЛЬФРАМ
БЕТТІМЕН ДЕЙТЕРИЙ ПЛАЗМАСЫНЫҢ ӨЗАРА ӘРЕКЕТТЕСУІ

И. А. Соколов^{1,2}, А. Ж. Миниязов¹, Г. К. Жанболатова^{1*}, Т. Р. Туленберген^{1,2},
Н. М. Мухамедова¹, Ә. Ж. Қайырбекова¹, А. А. Агатанова¹

¹ ҚР ҰЯО РМК «Атом энергиясы институты» филиалы, Курчатов, Қазақстан

² «Семей қаласының Шәкәрім атындағы университеті» КЕАҚ, Семей, Қазақстан

* Байланыс үшін E-mail: kaiyrdy@nnc.kz

Берілген жұмыс дейтерий плазмасының әсеріне ұшыраған кездегі вольфрамның беткі қабатының беткі морфологиясы мен құрылымдық-фазалық күйлерінің өзгеруіне аралас $W-C$ қабаттарының әсерін зерттеуге арналған. Карбидизация және плазмалық сәулелендіру бойынша тәжірибелер әртүрлі иондық энергиялар мен бет температураларында плазмалық шоктық қондырғыда (ПШҚ) жүргізілді. Карбидизация кезінде жұмыс газы ретінде метан (CH_4), ал плазманы сәулелендіру кезінде дейтерий пайдаланылды. 500 эВ иондық энергиясы бар D плазмасының аралас қабаттары бар вольфрам бетіне әсер етуі ~ 1750 °C температурада карбидті қосылыстардың толық жойылуына және вольфрамның одан әрі эрозиясына әкелді. Дегенмен, ~ 900 °C температурада екі фазаға негізделген аралас қабаттар (WC және W_2C) дейтерий әсеріне жоғары төзімділікке ие, бұл фаза мөлшерінің шамалы өзгеруімен дәлелденеді.

Түйін сөздер: вольфрам, вольфрам карбиді, плазма, дейтерий, сәулелену.

INTERACTION OF DEUTERIUM PLASMA WITH A TUNGSTEN SURFACE
AFTER CARBIDIZATION IN THE BPD

I. A. Sokolov^{1,2}, A. Zh. Miniyazov¹, G. K. Zhanbolatova^{1*}, T. R. Tulenbergenov^{1,2},
N. M. Mukhamedova¹, A. Zh. Kaiyrbekova¹, A. A. Agatanova¹

¹ RSE NNC RK Branch "Institute of Atomic Energy", Kurchatov, Kazakhstan

² NPJSC "University named after Shakarim of Semey", Semey, Kazakhstan

* E-mail for contacts: kaiyrdy@nnc.kz

This work is devoted to studying the effect of mixed $W-C$ layers on the change in the surface morphology and structural-phase states of the tungsten surface layer under the influence of D plasma. Experiments on carbidization and plasma irradiation were carried out on a plasma-beam installation (PBI) at different ion energies and surface temperatures. Methane (CH_4) was used as a working gas during carbidization, and deuterium was used for plasma irradiation. The effect of D plasma with an ion energy of 500 eV on the tungsten surface with mixed layers led to the destruction of carbide compounds at a temperature of ~ 1750 °C and further erosion of tungsten. However, at a temperature of ~ 900 °C, mixed layers based on two phases (WC and W_2C) have a high resistance to deuterium action, as evidenced by an insignificant change in the phase content.

Keywords: tungsten, tungsten carbide, plasma, deuterium, irradiation.